Vol.14, No.1, Spring 2025, pp.79-98 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

Research Article DOI: 10.22067/geoeh.2024.88810.1500 Open Access

Evaluation of the seismic potential of Herat Fault in the west of Afghanistan based on Seismotectonic Parameters and Seismic Moment rate

Amin Mohammadi[a], Saeed Zarei[b]*

[a] MSc. in Department of Geophysics, Faculty of Nano and Bio Science and Technology, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

[b]Assistant Professor in Department of Geophysics, Faculty of Nano and Bio Science and Technology, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

Article Info

Article history
Received: *9 July 2024*
Received in revised form: *2 December 2024*
Accepted: *25 December 2024*
Available online : *21 March 2025*

Keywords:

Herat Fault, Fractal analysis of seismicity, Seismotectonics, Seismic moment rate, b-value, D-value, Western Afghanistan, Stress accumulation

Abstract

The western Herat Fault system is one of Afghanistan's most seismotectonically active regions, having experienced four Mw >6 earthquakes in 2023. Given the significance of this region and the occurrence of successive seismic events, this study investigated the seismotectonic dynamics of the area through seismicity parameters and fractal analysis. Here, changes in the seismicity rate were analyzed based on variations in the seismic parameter (b-value) and the fractal dimension of fracturing and seismicity (D-value) using available seismic data.

The study area was divided into nine primary zones, with each zone's parameters calculated. The largest fault fractal dimensions were identified in the southeastern, central, and northwestern zones, while the highest seismic fractal dimension was associated with the central and northwestern regions. The calculated b-values in the center of the study area, coinciding with the Herat Fault, indicate elevated stress accumulation, potentially signaling future large earthquakes.

The seismic moment rate, representing the rate of energy change released through seismic activity, was estimated at 1.18×10^{18} Nm/yr for the entire study area. Combined fractal analysis and seismic moment calculations suggest that the Zendeh-Jan, Injil, Ghurian, and Kushan districts are potential candidates for future earthquakes. These results reinforce the interpretation that western Afghanistan, as an evolving deformation zone, remains highly susceptible to seismic events.

*.Corresponding author: Dr. Saeed Zarei E-mail address: szarei@pgu.ac.ir

How to cite this article: Mohammadi, A., & Zarei, S. (2025). Evaluation of Seismic Potential of the Herat Fault in West of Afghanistan Based on Seismotectonic Parameters and Seismic Moment rate. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(1), pp. 79-98, DOI:https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.88810.1500

Extended Abstract

Introduction

The Alpine-Himalayan seismic belt passes through Afghanistan, making the country prone to frequent earthquakes that cause significant human and financial losses. The northeastern regions experience the highest rate of seismic activity. Recently, several earthquakes have occurred along the Herat Fault system, highlighting this region's seismic potential.

Fractal analysis is a statistical approach extensively used to analyze spatial variability (Turcotte, 1997; Dimiri, 2000). This research builds upon recent developments in seismic studies, including fractal analysis of earthquake distributions conducted in Turkey, Japan, and India (Nanjo & Nagahama, 2004; Singh et al., 2012), applying these methods to the Herat Fault system. The study estimates the b-value as an indicator of seismicity and the D-value as an indicator of earthquake and fault fractal dimensions using square-counting and least squares methods. The seismic moment rate is further estimated to study energy dissipation and tectonic mechanisms (Bridges & Gao, 2006; Pal, 2008). This represents one of the first comprehensive studies of seismic activity along the Herat Fault in Afghanistan.

Material and Methods

Seismic data from 2011 to 2024 were extracted from regional and global earthquake catalogs, including ISC, USGS, and historical earthquake reports. The data were refined using the Reasenberg spatial-temporal window in Zmap software to remove foreshocks and aftershocks. Earthquakes were plotted on fault and topographic layers in ArcGIS. Main fractures and faults were identified from USGS 1:500,000 geological maps and enhanced with remote sensing techniques using ETM+ and ASTER imagery in ENVI 5.6 and ER Mapper.

The b-value was calculated using the least squares method, where lower values indicate higher shear stress. Fractal dimensions were computed using the box-counting method and mapped using kriging in ArcGIS (D-value). Seismic moment rates in 36 subregions (30×30 km each) were estimated using instrumental and historical data, revealing stress concentrations on the Siyah Bobak and Herat faults.

Results and Discussion

The fractal dimension of fault zones **reveals** their geometry and complexity. **Higher** values indicate denser, more complex fault networks (Charchi et al., 2001). In this study, section 9 faults showed the highest fractal dimension, suggesting greater fault density and potentially higher seismic risk, particularly in southern and southeastern areas due to stress concentration.

Fractal analysis of earthquake distribution showed high fractal dimensions in central, northwest, and western subregions, indicating greater seismic clustering. However, these findings depend on catalog completeness, and Afghanistan's limited monitoring infrastructure necessitates reliance on corrected global databases.

The b-value (relative frequency of large vs. small earthquakes) is inversely proportional to stress. Values <1, as found along the Herat and Siyah Bobak faults, indicate higher shear stress and greater likelihood of large earthquakes (Scholz, 1968; Wyss, 1973). The D-value/b-value ratio suggests areas with low b-values and high D-values are more prone to significant seismic activity. High seismic moment rates around the Herat Fault correlate with 2023 seismic events, indicating blind faults and ongoing seismic potential (Johnston, 1996; Hanks, 1979; Kanamori, 1977).

Conclusions

The study reveals active deformation in Herat resulting from Indian-Eurasian plate movement, releasing substantial seismic energy. Zendeh-Jan, Injil, Ghurian, and Kushan represent high-risk areas, with the northwestern region showing particularly high seismicity. These findings underscore the need for improved fault mapping and infrastructure development.

Acknowledgment

The authors thank Persian Gulf University for their support and research environment. Special gratitude to Dr. Shabir Ashkpoor Motlagh and Dr. Sayyed Reza Mansouri for their valuable suggestions and article review.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682

جلد ۱۴، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴، صص ۹۸-۷۹

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2024.88810.1500 دسترسی آزاد

ارزیابی توان لرزه‌خیزی گسل هرات در غرب افغانستان بر پایه فراسنج‌های لرزه‌زمین‌ساختی و نرخ گشتاور لرزه‌ای

امین محمدی[۱]، سعید زارعی[۲]*

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد گروه ژئوفیزیک، دانشکده علوم و فناوری نانو و زیستی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران
[۲] استادیار گروه ژئوفیزیک، دانشکده علوم و فناوری نانو و زیستی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۹/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۵

کلمات کلیدی:

گسل هرات

تحلیل فرکتالی لرزه‌خیزی

زمین‌لرزه‌شناسی ساختمانی

نرخ گشتاور لرزه‌ای

مقدارb

مقدارD

غرب افغانستان

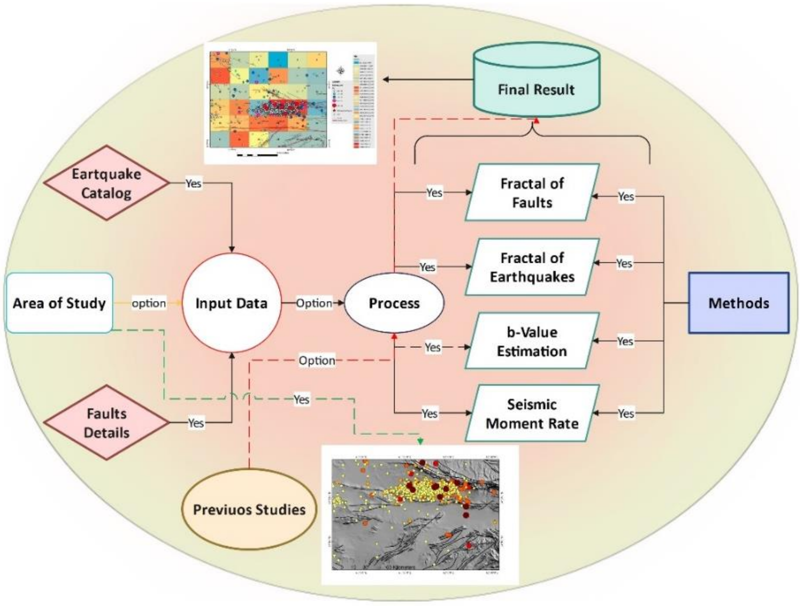
انباشتن تنش

چکیده

سیستم گسلی هرات غربی یکی از پهنه‌های فعال لرزه‌زمین‌ساختی افغانستان می‌باشد که در سال ۲۰۲۳ چهار زمین‌لرزه با $Mw > 6$ را تجربه نموده است. نظر به اهمیت این منطقه و رخداد لرزه‌ای متوالی، در این پژوهش پویایی لرزه‌زمین‌ساختی منطقه بر اساس فراسنج‌های لرزه‌خیزی و تحلیل فرکتالی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، تغییرات نرخ لرزه‌خیزی منطقه بر پایه تغییرات فراسنج لرزه‌خیزی (b-value) و بعد فرکتال شکستگی و لرزه‌خیزی (D-value) با استفاده از داده‌های لرزه‌ای موجود بررسی و تحلیل شده است. در یک تقسیم بندی منطقه مورد مطالعه به ۹ پهنه اولیه تقسیم شده و در هر پهنه فراسنج‌های لازم محاسبه شده است. بزرگترین ابعاد فرکتالی گسل محاسبه شده مربوط به پهنه‌های جنوب شرقی، مرکزی و شمال غربی است و بیشترین مقدار بعد فرکتالی لرزه‌خیزی مربوط به مناطق مرکزی و شمال غربی می‌باشد. مقادیر محاسبه شده برای پارامتر b در مرکز محدوده مطالعاتی و منطبق بر گسل هرات نشان‌دهنده افزایش تنش در این ناحیه بوده که ممکن است هشداری برای وقوع یک زمین‌لرزه بزرگ در آینده باشد. نرخ گشتاور لرزه ای نشان دهنده نرخ تغییر در انرژی سطح زمین است که به تغییرات لرزه ای تبدیل می شود. مقدار نرخ گشتاور لرزه‌ای برای کل منطقه مطالعاتی $1/18 \times 10^{18}\ Nmyr^{-1}$ برآورد شده است. با توجه به مجموع تحلیل‌های فرکتالی و محاسبه گشتاورهای لرزه‌ای منطقه، مناطق زنده‌جان، انجیل، غوریان و کوشان می‌توانند به عنوان کاندیدای زلزله‌های بعدی معرفی شوند. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده این دیدگاه را تقویت می‌کند که غرب افغانستان به عنوان پهنه‌ای دگرشکلی در حال تکامل، مستعد رخدادهای لرزه‌ای بیشتری است.

* نویسنده مسئول: دکتر سعید زارعی E-mail: szarei@pgu.ac.ir

چکیده تصویری



مقدمه

افغانستان در مسیر کمربند لرزه‌خیز آلپ-هیمالیا قرار دارد و به همین دلیل، تاریخچه‌ای طولانی از وقوع زمین‌لرزه‌های کوچک و بزرگ را داراست که گاه موجب فجایع انسانی و مالی فراوانی شده است. مناطق شمال‌شرقی افغانستان، شامل ایبک، پل‌خمری، تالقان و فیض‌آباد، به عنوان زلزله‌خیزترین نواحی کشور شناخته می‌شوند. هم‌چنین، زلزله‌های اخیر در هرات، که بر روی سامانه گسلی هرات واقع شدند، نشان می‌دهند که این منطقه نیز به عنوان یکی از نواحی مستعد لرزه خیزی محسوب می‌گردد.

تحلیل فرکتالی یکی از روش‌های رایج برای بررسی نحوه توزیع و اندازه متغیرها در فضاهای مختلف است (Turcotte, 1997; Dimiri, 2000). به کمک این روش آماری، سیستم گسلی هرات در غرب افغانستان مورد بررسی قرار گرفته است. در سال‌های اخیر، مطالعات لرزه‌شناسی مبتنی بر برآورد آماری ویژگی‌های فرکتالی زمین‌لرزه‌ها و گسل‌های فعال در بسیاری از مناطق جهان از جمله ترکیه، ژاپن و هند توسعه چشم‌گیری داشته است (Nanjo & Nagahama, 2004; Singh et al., 2012). در حالت نرمال، این فراسنج به مقدار ۱ نزدیک است، اما معمولاً ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی مناطق مختلف باعث انحراف از این مقدار می‌شود (Bridges & Gao, 2006; Pal, 2008).

نرخ گشتاور لرزه‌ای به عنوان یک نماینده از پتانسیل لرزه‌خیزی یک منطقه و نرخ تغییرات انرژی سطح پوسته برای تبدیل به تغییرات لرزه‌ای شناخته می‌شود. لرزه‌شناسان برای سنجش میزان انرژی آزاد شده از یک

زمین‌لرزه از گشتاور لرزه‌ای استفاده می‌کنند. گشتاور لرزه‌ای بهترین کمیت برای بررسی تأثیر زلزله در تغییرات زمین‌ساختی است، چرا که بیانگر انرژی آزاد شده توسط زمین‌لرزه می‌باشد.

پژوهش‌های متعددی جهت برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی و شناسایی چشمه‌های لرزه‌زا در بخش‌های مختلف ایران و جهان انجام شده است (Öncel & Wilson, 2001; Tavakoli Zadeh, Rahimi & Ghaemi, 2016). یاداو و همکاران (Yadav, Gahalaut, Chopra & Shan, 2012) نشان دادند که مقدار بُعد فرکتالی برای زلزله‌های نقطه‌ای در مناطق فرورانش برابر با ۱ است و برای سطوح شکستگی صفحه‌ای مقادیر نزدیک به ۲ و شکستگی در حجم پوسته مقادیر نزدیک به ۳ را نشان می‌دهد. فدعمی و همکاران (Fadami, Zarei & Ashkpoor Motlagh, 2021) با استفاده از تحلیل فرکتالی و پارامترهای لرزه‌ای، ناهمسانی لرزه‌ای در پهنه خوزستان را بدست آوردند و نسبت بین b-Value و D-value را در این منطقه محاسبه کرده و تنشگاه‌ها را شناسایی کردند. رومینا و همکاران (Roumina, Zarei, Mansouri & Azadijou, 2023) نیز توزیع لرزه‌خیزی در جنوب زاگرس را با استفاده از همبستگی آماری بین b-value و بعد فرکتالی لرزه‌خیزی بررسی کرده و مناطق پرخطر در آینده را شناسایی کردند. زارعی و همکاران (Zarei, Khatib, Zare & Moussavi, 2020) برای شمال لوت و رشیدی و همکاران (Rashidi, Khatib, Mosavi & Jamor, 2017) به بررسی لرزه‌خیزی جنوب باختری لوت به کمک نرخ گشتاورها پرداختند. پان و همکاران (Pan, Yun & Shao, 2020) به تجزیه و تحلیل ژئودتیکی و لرزه‌ای شمال شرقی تبت پرداختند. در این پژوهش، ابتدا منطقه به ۹ پهنه اصلی تقسیم شده و مقادیر D-value به روش مربع شمار و b-value به روش حداقل مربعات محاسبه شده است. سپس نسبت بین این دو پارامتر نیز برآورد گردیده است. برای هر یک از این پهنه‌ها، مقدار بعد فرکتالی لرزه‌خیزی و شکستگی محاسبه شده و با استفاده از روش کریجینگ[1] در نرم‌افزار ArcGIS 10.7.1 پهنه‌بندی صورت گرفته است. سپس مقدار انرژی آزاد شده در فعالیت‌های لرزه‌ای با استفاده از برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای برای ۳۶ پهنه تهیه شده و پویایی لرزه‌زمین‌ساختی منطقه تحلیل شده است. این تحقیق جزء اولین مطالعات لرزه‌زمین‌ساختی در منطقه هرات افغانستان است.

مواد و روش‌ها

زمین شناسی منطقه مطالعاتی

افغانستان در کمربند کوهزایی فعال آلپ-هیمالیا قرار دارد. این کمربند نتیجه‌ی هم‌گرایی صفحات هند و اوراسیا از اواخر پالئوژن تا به امروز است (Ambraseys & Melville, 1982). این منطقه شاهد وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ و کم‌عمق است، هرچند برخی از زمین‌لرزه‌های عمیق نیز با مکانیزم فرورانشی در زون پامیر-هندوکش رخ می‌دهند (Abdullah, 1993). افغانستان از نظر تکتونیکی دارای ساختارهای پیچیده و پتانسیل بالای لرزه‌خیزی است (شکل ۱-الف). افغانستان از زون‌های تکتونیکی مجزایی تشکیل شده که هر

1 Kriging

کدام ویژگی‌های منحصر به فردی دارند (Siehl, 2017). در شکل ۱-ب، مرزهای این زون‌ها عمدتاً توسط گسل‌ها مشخص شده‌اند.

منطقه مورد مطالعه در پهنه تکتونیکی گسل هرات در غرب افغانستان قرار دارد (شکل ۱-ج) که تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی فعال است. این منطقه شامل توالی‌های سنگی متنوعی از سنگ‌های رسوبی، آذرین و دگرگونی است که در اثر فعالیت‌های گسلی مانند گسل هرات و گسل‌های فرعی نظیر قرغنه، کاج و سیاه‌بوبک دچار تغییرات ساختاری شده‌اند. گسل هرات که با روند شرقی-غربی امتداد دارد، ساختار زمین‌شناسی منطقه را به دو بخش تقسیم کرده و با ایجاد شکستگی‌ها و جابه‌جایی‌های لایه‌ها، تغییرات عمده‌ای در توپوگرافی و بستر رودخانه‌ها ایجاد کرده است. این منطقه مستعد زمین‌لرزه‌های مخرب است و این لرزه‌خیزی تأثیرات قابل‌توجهی بر زمین‌شناسی و زندگی ساکنان منطقه دارد.

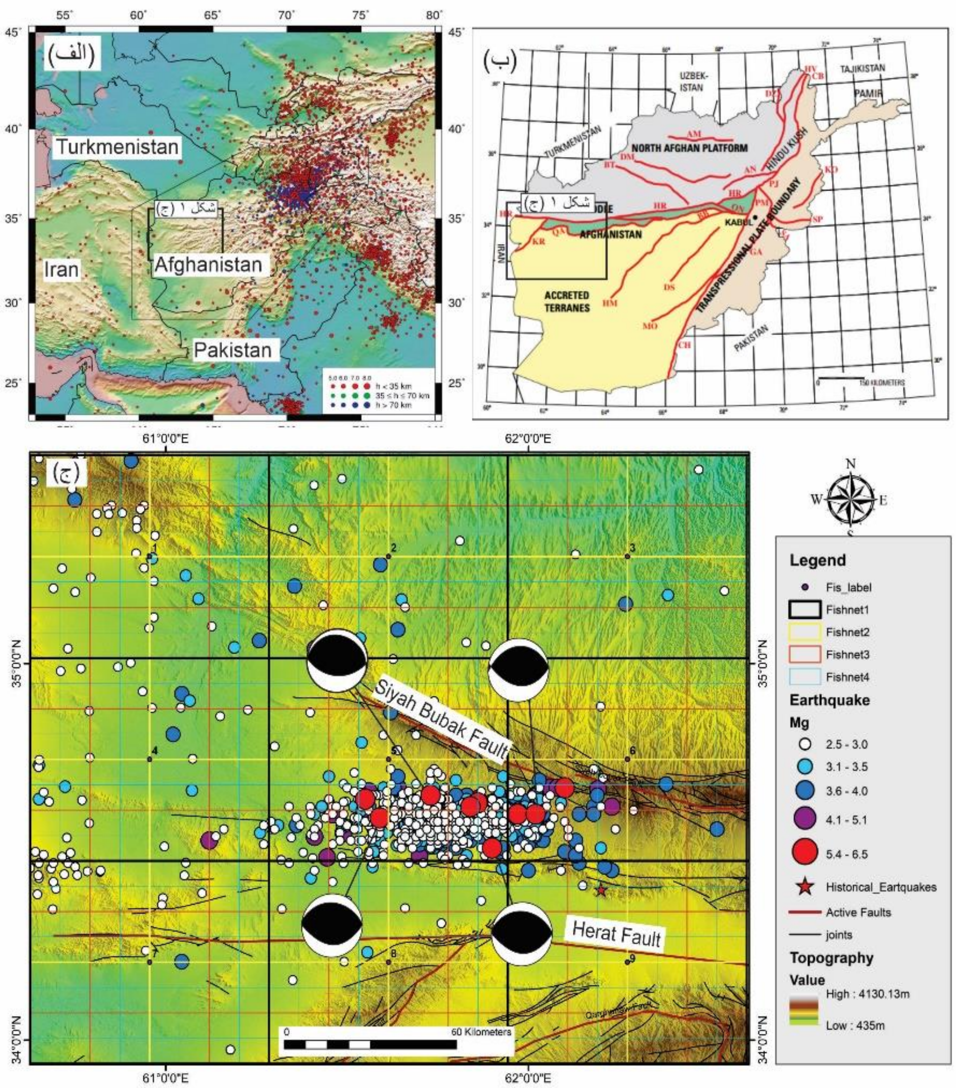
گسل‌های فعال منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در مختصات ۳۴ تا ۳۵.۵ درجه شمالی و ۶۱ تا ۶۲.۵ درجه شرقی قرار دارد و شامل بخش غربی سیستم گسل هرات، گسل سیاه‌بوبک در شمال و گسل قرغنه در جنوب است. گسل هرات یک گسل امتدادلغز راست‌گرد است که از شرق افغانستان تا غرب امتداد دارد و با نرخ لغزش درازمدت حدود ۳ میلی‌متر در سال از حدود ۲ میلیون سال پیش فعال بوده است (Shnizai, 2020) (شکل ۱). این گسل در دوره اولیگوسن-میوسن دوباره فعال شد و شکستگی‌های جنوبی مرتبط با آن در دوره ترشیری به صورت امتدادلغز بازفعال شدند (Treloar & Izatt, 1993). گسل هرات بیشتر به عنوان یک سیستم گسلی با شاخه‌های فرعی متعدد در غرب افغانستان شناخته می‌شود. گسل کاج، یکی از این گسل‌های فرعی، با روند شمال شرقی-جنوب غربی در جنوب گسل هرات و با طول حدود ۱۳۰ کیلومتر قرار دارد. همچنین، گسل قرغنه به صورت یک گسل امتدادلغز راست‌گرد از شرق به غرب امتداد دارد (Abdullah, Chmyriov & Dronov, 2008). گسل سیاه‌بوبک با طول ۲۰ کیلومتر در شمال غربی هرات و نزدیک شهرستان سیاه‌بوبک واقع شده و فعالیت لرزه‌ای آن می‌تواند اثرات جدی بر جمعیت محلی داشته باشد (شکل ۱-ج).

زلزله‌های تاریخی هرات

جدول ۱ زمین‌لرزه‌های تاریخی سیستم گسلی هرات را نشان می‌دهد. از تاریخ ۷ اکتبر ۲۰۲۳، رخدادهای زلزله پی در پی با بزرگی قابل توجه، ناحیه غرب افغانستان به‌ویژه منطقه هرات را تحت تأثیر قرار داده است. براساس گزارش‌های مرکز لرزه‌نگاری IRSC[1]، در بازه زمانی ۷ تا ۱۵ اکتبر ۲۰۲۳، پنج زلزله با بزرگای ۶.۳ تا ۶.۵ در این منطقه به وقوع پیوست.

1 Iranian Seismological Center



شکل۱- الف) نقشه توپوگرافی افغانستان و کشورهای همسایه به همراه زمین لرزه‌های اصلی. ب) نقشه لرزه-زمین‌ساخت افغانستان: شمال افغانستان به رنگ خاکستری، افغانستان مرکزی به رنگ سبز؛ سرزمین‌های مرتفع به رنگ زرد و رنگ قهوه‌ای مرزهای ترافشارشی چپگرد بین صفحات هند و اوراسیا. ج) نقشه لرزه زمین‌ساخت منطقه مطالعاتی که در آن گسل‌های اصلی و فعال منطقه از جمله گسل‌های هرات، کاج، قرغنه و سیاه‌بوبک نشان داده شده است. گسل هرات در مرکز نقشه با روند شرقی-غربی نشان داده شده است.

Fig.1. a) Topographic map of Afghanistan and neighboring countries along with major earthquakes. b) Seismotectonic map of Afghanistan: northern Afghanistan is shown in gray, central Afghanistan in green, highlands in yellow, and the transpressional left-lateral boundaries between the Indian and Eurasian plates are marked in brown. c) Seismotectonic map of the study area, highlighting the major and active faults in the region, including the Herat, Kaj, Qarghanaw, and Siyah Bubak faults. The Herat Fault is displayed in the center of the map with an east-west trend.

جدول ۱- رویداد های تاریخی منطقه مورد مطالعه با بزرگای بالاتر از ۴
Table 1- Historical events in the study area with magnitudes greater than 4

منطقه Region	بزرگا Magnitude (Ms)	عمق (کیلومتر) Depth (Km)	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	زمان رخداد Time (UTC)
Herat	5.6	15	62.2	34.3	**849**
Herat	4.5	179.2	63.219	34.126	**1102-02-28**
Herat	4.6	10	61.852	34.89	**1364-02-19**
Herat	4.5	10	61.571	34.772	**1908-06-26**
Herat	4.5	33	61.997	34.585	**1931-09-10**
Herat	4.5	33	61.997	34.585	**1978-05-07**
Herat	4.6	33	62.233	33.951	**1982-10-17**
Herat	4.4	33	61.905	33.466	**1986-12-10**
Herat	4.5	179.2	63.219	34.126	**1990-06-11**

روش انجام پژوهش

داده‌های لرزه‌ای دستگاهی از کاتالوگ لرزه‌خیزی آسیای میانه، سایت‌هایISC, USGS و موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران از سال ۲۰۱۱-۲۰۲۴ و زمین‌لرزه‌های تاریخی منطقه مورد مطالعه از گزارش‌های موجود جمع-آوری شده است. بعد از تصحیحات لازم و حذف پس‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها با پنجره مکانی-زمانی ریزنبرگ[1] در نرم افزار Zmap، در نهایت زلزله‌ها استخراج شده و در نرم افزار ArcGIS بر روی لایه‌های گسل و توپوگرافی پلات شده است. شکستگی‌ها و گسل‌های اصلی منطقه را از نقشه‌های زمین‌شناسی تهیه شده با مقیاس (۱:۵۰۰۰۰۰) توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا شناسایی و بارزسازی خطواره‌ها را با استفاده مطالعات دورسنجی، فیلترگذاری تصاویر ETM 8 و ASTER 15m در نرم‌افزارهایENVI 5.6 و ER mapper آماده و در نرم افزار ArcGIS بارگذاری شده است.

b-value منطقه مورد مطالعه با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و به روش حداقل مربعات محاسبه شده است. روش‌های بیشترین احتمال و حداقل مربعات روش‌های برای محاسبه مقدار فراسنج b هستند. روش حداقل مربعات وزن‌دار با برازش خطی بر منحنی توزیع بزرگی-فراوانی منطبق می‌شود و شیب این خط به عنوان b-value لحاظ می‌گردد. مناطق با مقدار b-value کوچک‌تر معمولا تنش برشی بیشتری را تجربه کرده‌اند (Bayrak & Öztürk, 2008). در واقع مناطق دارای مقدار کمتر b دارای احتمال گسیختگی بیشتر و وقوع زمین لرزه بزرگتری هستند.

فرکتال لرزه‌خیزی و شکستگی ها (D-value) با استفاده از روش مربع شمار[2] محاسبه و با استفاده از روش کریجینگ در افزونه زمین‌آمار نرم‌افزار ArcGIS پهنه‌بندی شده است. کل محدوده مطالعاتی را به شبکه‌ای از پهنه‌های اصلی ۶۰ کیلومتر در نرم افزار ArcGIS و MATLAB طراحی شده و سپس تا چهار مرحله، هربار

1 Reasenberg Declustering
2 Box-counting

هر مربع به چهار مربع کوچکتر تقسیم شده است (شکل۱-ج). فرکتال برای توصیف یک شکل هندسی بکار می‌رود، که با تفکیک آن به اشکال هندسی کوچک‌تر، یک هندسه همانند حفظ می‌شوند. تحلیل الگوی فرکتالی عوارض و ساختارهای زمین‌شناسی می‌تواند برای تعیین فعالیت زمین‌ساختی استفاده گردد (Cheng, Agterberg & Ballantyne, 1994). براساس تورکات (Turcotte, 1997)، مجموعه فرکتال به صورت زیر(رابطه۱) تعریف می شود:

$$Ni = \frac{C}{r_i^D} \qquad (۱)$$

که در این رابطه Ni، ri ، C به ترتیب تعداد پدیده‌ها، بعد خطی ویژه و ثابت رابطه و D بعد فرکتال است. این رابطه را(رابطه ۲) می‌توان به صورت دیگر نیز بیان کرد:

$$D = \frac{Log(\frac{Ni+1}{Ni})}{Log(\frac{ri}{ri+1})} \qquad (۲)$$

که در این معادله D بعد فرکتال، N تعداد پدیده‌ها، r طول مربع در هر مرتبه و i مرتبه است. می توان شکل ساده‌تر از رابطه ۲ به صورت رابطه ۳ نوشت:

$$Log(N) = C + K\log\left(\frac{1}{S}\right) \qquad (۳)$$

در این رابطه N تعداد پدیده‌ها، S اندازه شبکه به کار گرفته شده، a ثابت رابطه و k بُعد فرکتالی است. تحلیل‌ها بر اساس نمودار $\log - \log$ از تعداد مربع‌های حاوی ساختار N_n بر حسب عکس طول شبکه‌های ایجاد شده ($1/ r_n$) صورت می‌گیرد. طبق رابطه۴:

$$\log(N_n) = D.\log\left(\frac{۱}{r_n}\right) + c \qquad (۴)$$

در این رابطه D شیب خط برازش شده و نشان‌دهنده بعد فرکتالی می‌باشد که دامنه تغییرات این ضریب در روش مربع‌شمار و در یک سامانه دو بعدی می‌تواند عددی در بازه صفر تا ۲ مربوط به مناطق پویا از لحاظ لرزه‌خیزی باشد (Yadav et al., 2012). مقادیر Dc نزدیک به صفر می‌تواند مربوط به تراکم زمین‌لرزه‌ها در یک نقطه باشد، مقادیر نزدیک به یک می‌تواند مربوط به پراکندگی خطی زلزله ها در یک پهنهٔ فرورانشی باشد و مقادیر نزدیک‌تر به دو نشان‌دهندهٔ شکستگی صفحه‌ای باشد. در سامانهٔ سه بُعدی این مقدار می‌تواند تا ۳ نیز تغییر کند که مقادیر نزدیک‌تر به ۳ مرتبط به حجم پوسته توسط گسل‌های ایجاد شده در اثر زلزله‌های انباشته شده باشد (Tosi, Rubeis, Loreto & Pietronero, 2008).

نتایج و بحث

برآورد فرکتال گسلی

توزیع فرکتالی شکستگی‌ها یا بعد فرکتال در یک پهنه گسلی، نحوه فعالیت و گسترش گسل را نشان می‌دهد (Charchi, Khatib, Mozafarkhah & Barjasteh, 2001). گسل‌ها به‌عنوان پارامترهای مهم در مطالعات لرزه‌زمین‌ساختی مورد بررسی قرار می‌گیرند و تحلیل هندسه فرکتالی آن‌ها بر پایه خودهمسانی است. مقادیر

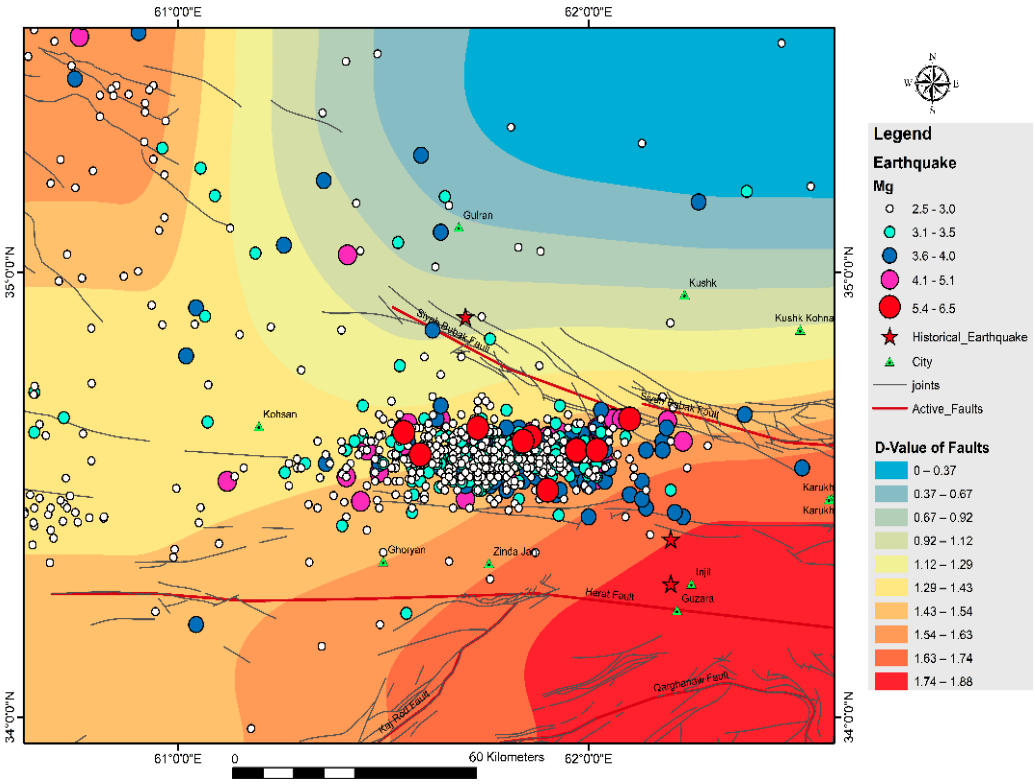
بزرگتر بعد فرکتالی نشان‌دهنده بی‌نظمی بیشتر هندسه گسل و تراکم بیشتر شکستگی‌ها در یک سطح رخنمون است، که بیانگر پیچیدگی بیشتر هندسه گسل در مناطق با بعد فرکتالی بالاتر می‌باشد. توزیع فضایی گسل‌ها بر مقدار عددی بعد فرکتالی تاثیر می‌گذارد و شدت شکستگی‌ها معرف مقدار بعد فرکتال سامانه گسلی است. هر پهنه گسلی به‌صورت جداگانه ارزیابی شده و برای هر یک بعد فرکتالی محاسبه شده است. جدول ۲ مقادیر بعد فرکتالی گسل در پهنه‌های ۹ گانه را نشان می‌دهد و شکل ۲ پهنه‌بندی آن‌ها را در محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد. مقدار کم بعد فرکتالی در سیستم‌های گسلی نشان‌دهنده محدودیت گستره سطحی گسل و رسیدن آن به حداکثر دگرشکلی است.

جدول ۲-نتایج عددی ابعاد فرکتالی D-value در هر پهنه

Table 2- Numerical results of fractal dimensions (D-value) in each zone

D1 = 1.6274	D2 = 0.387	D3 = 0
D4 = 1.2943	D5 = 1.3262	D6 = 1.5686
D7 = 1.4925	D8 = 1.6585	D9 1.8844

در این مطالعه، پهنه ۹ دارای بیشترین مقدار بعد فرکتالی بوده و پس از آن بخش‌های ۸، ۱، ۶ و ۷ قرار دارند. ابعاد فرکتالی به سمت جنوب و جنوب شرقی افزایش یافته که ممکن است به دلیل تراکم میدان تنش و افزایش پتانسیل لرزه‌زایی در این مناطق باشد.



شکل۲- نقشه پهنه‌بندی بعد فرکتالی گسل‌ها، رنگ‌های گرم (قرمز) مناطق با ابعاد فرکتالی بالاتر و رنگ-های سرد (آبی) مناطق با ابعاد فرکتالی پایین‌تر را نشان می‌دهند.

Fig.2. The fractal dimension zoning map of faults. Warm colors (red) indicate areas with higher fractal dimensions, while cool colors (blue) represent areas with lower fractal dimensions.

برآورد فرکتالی زمین‌لرزه‌ها

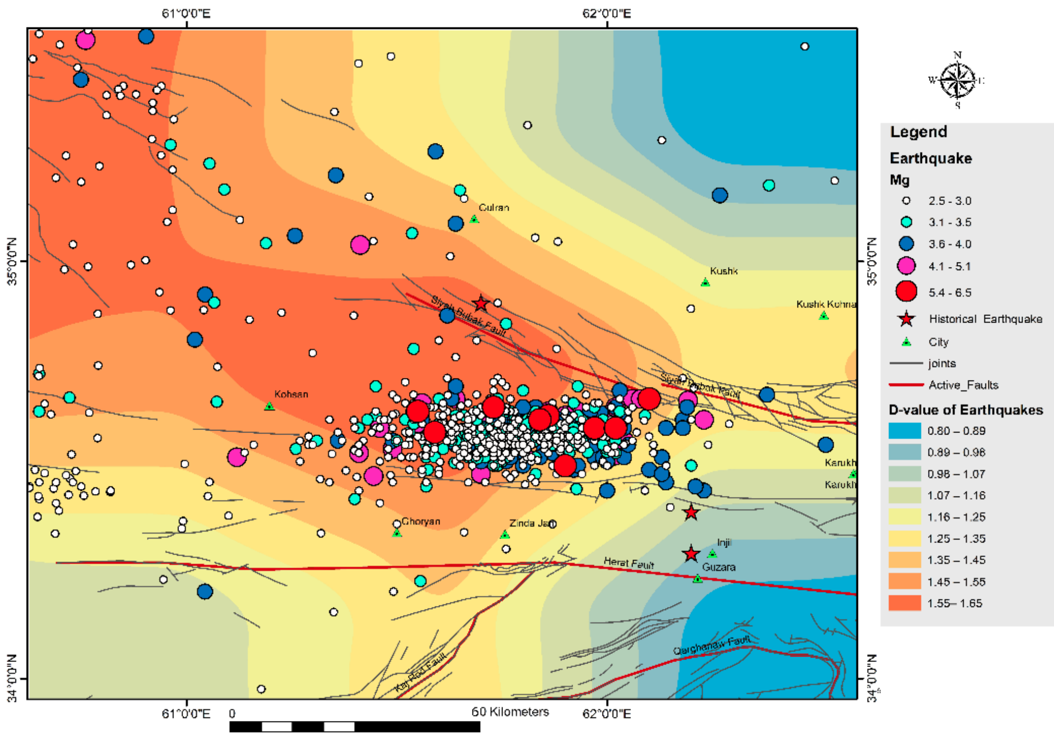
برای بررسی ارتباط گسل‌های منطقه با زمین‌لرزه‌های رخداده در منطقه مطالعاتی، پس از محاسبه بعد فرکتالی سیستم‌های گسلی در منطقه مورد مطالعه، فرکتال زمین‌لرزه‌ها نیز محاسبه شد. نتایج در جدول۳ مقدار فرکتال هر مربع را نشان می‌دهد، و در شکل۳، پهنه‌بندی منطقه بر اساس این مقادیر ارائه شده است. با توجه به اینکه افزایش بعد فرکتالی در منطقه نشانه‌ای از فراوانی بیشتر زمین‌لرزه‌ها است، می‌توان نتیجه گرفت که بخش‌های مرکزی، شمال غرب و غرب منطقه شامل زیرپهنه‌های ۵، ۴، ۱ و ۶ دارای تراکم بالاتری از رخدادهای لرزه‌ای نسبت به سایر نواحی هستند (شکل۳).

جدول۳- نتایج عددی ابعاد فرکتالی زلزله‌ها D-value در هر پهنه

Table 3- Numerical results of earthquake fractal dimensions (D-value) in each zone

D1 =1.5561	D2 = 1.2561	D3 = 0.8077
D4 = 1.5561	D5 = 1.7557	D6 = 1.4381
D7 = 1.0966	D8 = 1.3415	D9 = 0.834

بالا بودن بعد فرکتالی شکستگی و پایین بودن بعد فرکتالی لرزه‌خیزی در نواحی جنوبی و جنوب شرقی نشان می‌دهد که گسل‌های این مناطق هنوز انرژی ذخیره‌شده خود را آزاد نکرده‌اند و پتانسیل لرزه‌زایی بالایی دارند.



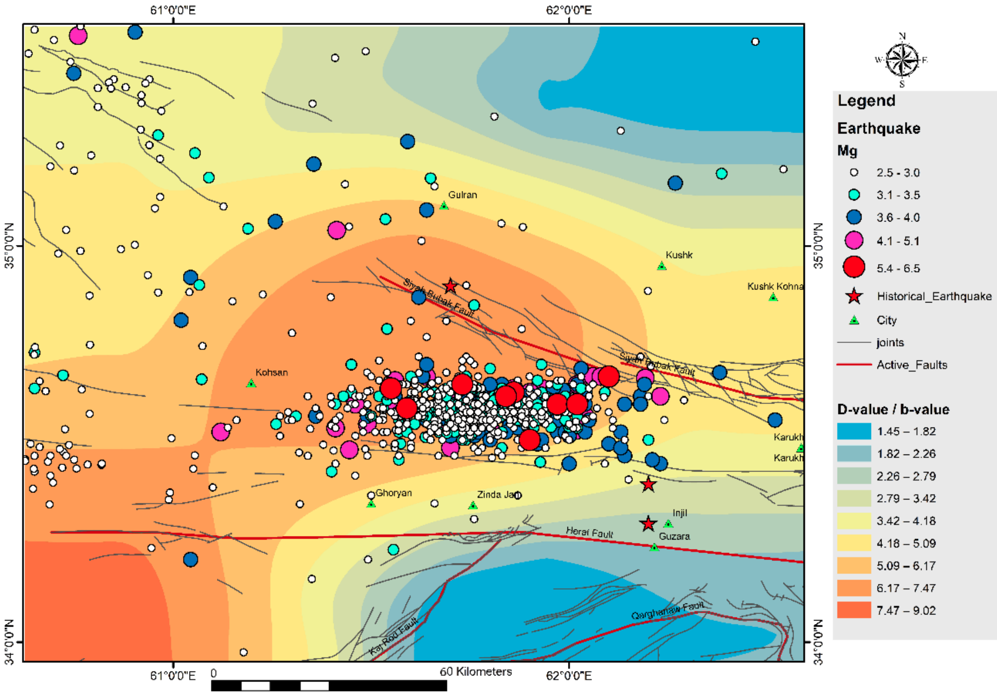
شکل۳-نقشه پهنه بندی بعد فرکتالی رومرکز زلزله‌ها

Fig.3. The fractal dimension zoning map of earthquake epicenters

برآورد b-value

مقدارb، علاوه بر نشان‌دادن رابطه نسبی تعداد زمین‌لرزه‌های بزرگ و کوچک در یک ناحیه، به شرایط تنش آن نیز وابسته است. رابطه‌ای معکوس بین b-value و تنش انحرافی وجود دارد، به طوری که مقدار b می‌تواند به عنوان تنش‌سنج عمل کن. در شرایط معمول زمین‌ساختی، مقدار b نزدیک به ۱ است، اما وجود شکستگی‌های مختلف و گرادیان حرارتی می‌تواند آن را افزایش دهد، در حالی که تنش فشارشی و مؤثر بالاتر موجب کاهش b می‌شود (Scholz, 1968; Wyss, 1973). مناطق با b-value کمتر اغلب در معرض تنش برشی بیشتری قرار

دارند و در پی زمین‌لرزه‌های اصلی، با احتمال بالاتر وقوع شکستگی و زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر همراهند. در شکل ۴ نقشه پهنه‌بندی b-value برای منطقه مطالعاتی ارائه شده است.



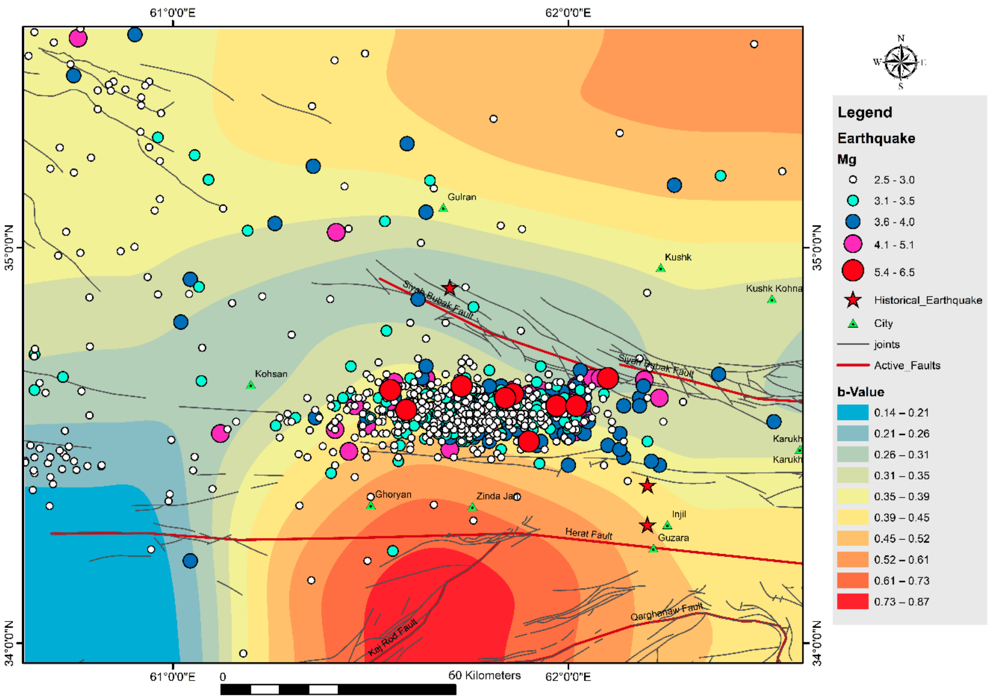
شکل۴- نقشه پهنه بندی تغییرات b-value. نقشه شامل ۹ پهنه می‌باشد که مقدار بعد فرکتال در هر پهنه محاسبه و سپس به روش کریجینگ در GIS پهنه‌بندی شده است.

Fig.4. Zoning map of b-value variations, and. The map consists of 9 zones where the fractal dimension value in each zone is calculated and then zoned using the Kriging method in GIS.

برآورد نسبت D-value/b-value

همبستگی مثبت یا منفی بین D-value و b-value با الگوهای مختلف شکست در مجموعه‌های فعال گسلی مرتبط است. مقدار بالای D نشان‌دهنده شبکه‌های گسلی متراکم‌تر و پیچیده‌تر است، که به دلیل تراکم بالای گسلش در این مناطق رخ می‌دهد (Oncel & Wilson, 2002). مناطقی با مقدار b کمتر معمولاً تنش برشی بیشتری را پس از زلزله‌های اصلی تجربه می‌کنند، در حالی که مقادیر بالاتر b به مناطق دارای لغزش اشاره دارند (Bayrak & Öztürk, 2004). ارتباط بین D و b، اطلاعات ارزشمندی درباره لرزه‌زمین‌ساخت منطقه ارائه می‌دهد (Bayrak & Bayrak, 2012). به طور کلی، مقادیر کم b و مقادیر زیاد D نشان‌دهنده تنش‌گاه‌ها و مناطقی با خطر لرزه‌ای بالا هستند، در حالی که مقادیر بالای b و مقادیر کم D بیانگر مناطق با خزش گسل است. در شکل ۵، نقشه پهنه‌بندی نسبت D به b نشان داده شده است. این نقشه نشان می‌دهد که بخش‌های

شرقی و جنوبی منطقه دارای مقادیر کمتری از این نسبت بوده، در حالی که بخش‌های مرکزی، در امتداد گسل هرات و بخش‌های غربی، مقادیر بالاتری دارند.



شکل۵- نقشه پهنه‌بندی شده بر اساس نسبت D-value / b-value

Fig.5. Zoning map based on the D-value / b-value ratio

برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای

نرخ گشتاور لرزه‌ای که نشان‌دهنده مولفه لرزه‌ای تغییر شکل‌ها است، با استفاده از روابط تجربی قابل محاسبه است. یکی از روش‌های رایج برای برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای، استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری زمین‌لرزه‌ها و کاتالوگ‌های زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی است. در این روش با توجه به روابط تجربی موجود بین بزرگاهای مختلف (M_W ,M_S , m_b , M_L) و گشتاور لرزه‌ای اسکالر، می توان گشتاور لرزه‌ای را برای هر زمین‌لرزه محاسبه و سپس نرخ گشتاور لرزه‌ای را تعیین کرد. روابطه‌ای استفاده شده در این پژوهش عبارت است از:

بر اساس رابطه ۵ M_W (Kanamori, 1977)

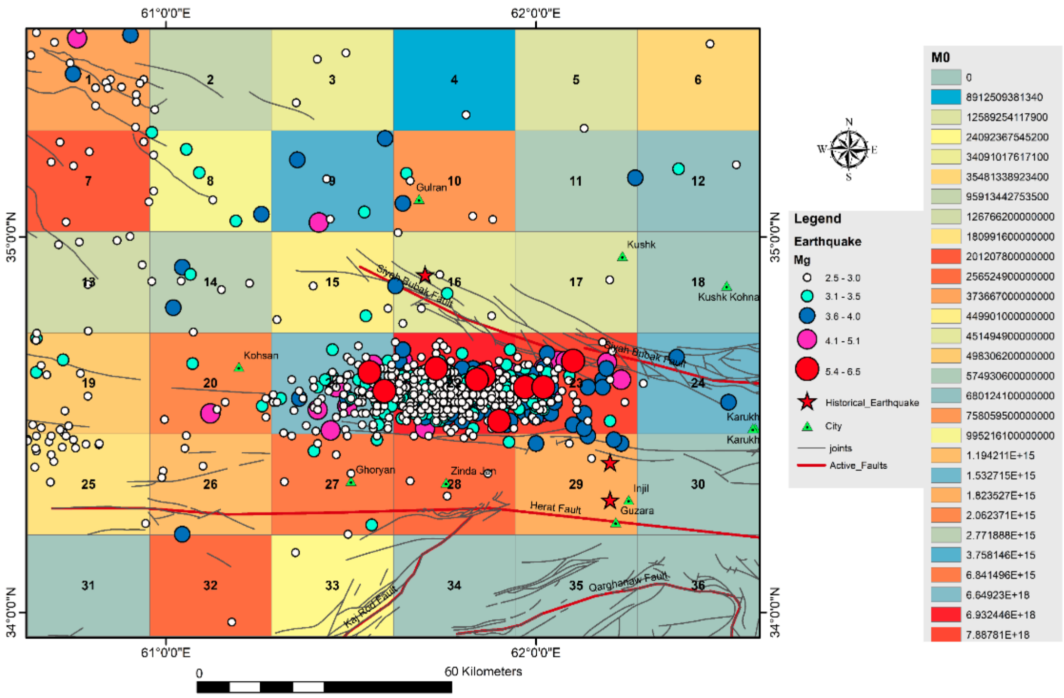
$$M_W = \frac{2}{3}\log(M_o/Nm) - 6.0 \qquad (۵)$$

که برای روابط ۳ تا ۵ مقدار M_0 حسب نیوتون متر $(N.m)$ می باشد.

جهت تبدیل گشتاور لرزه‌ای به نرخ گشتاور از دو روش میان گیری بر اساس سال‌های موجود و رسم نمودار گشتاور تجمعی در مقابل سال‌های موجود در کاتالوگ زمین‌لرزه‌ای و اندازه‌گیری شیب خط استفاده می شود. در این مرحله، منطقه مطالعاتی به ۳۶ پهنه با ابعاد حدودی ۳۰ کیلومتر در ۳۰ کیلومتر تقسیم شده و نرخ

گشتاور لرزه‌ای در هر پهنه محاسبه شده است (شکل۶). بیشترین نرخ گشتاور لرزه‌ای مربوط به پهنه‌های ۲۲، ۲۳، و ۷ و پس از آن پهنه‌های ۲۰، ۲۷ و ۲۸ است که در حوالی گسل‌های سیاه بوبک و گسل اصلی هرات و در نزدیکی شهرهای زنده‌جان، انجیل، غوریان و بخش‌هایی از استان خراسان رضوی ایران واقع شده‌اند.

نتایج نشان می‌دهد که بیشترین انرژی آزاد شده در منطقه هرات مربوط به پهنه‌هایی است که زمین‌لرزه‌های با بزرگای بالای ۶ در سال ۲۰۲۳ در آن‌ها رخ دادند و نرخ گشتاور لرزه‌ای در این مناطق بالاتر است. کمترین نرخ گشتاور لرزه‌ای در مناطق مرزی با ترکمنستان و بخش‌های شرقی منطقه مطالعاتی مشاهده شده است. همچنین، مناطق با نرخ بالای گشتاور لرزه‌ای و فرکتال گسلی پایین می‌توانند نمایانگر وجود گسل‌های پنهان باشند؛ بنابراین تدقیق این گسل‌ها در این مناطق توصیه می‌شود.



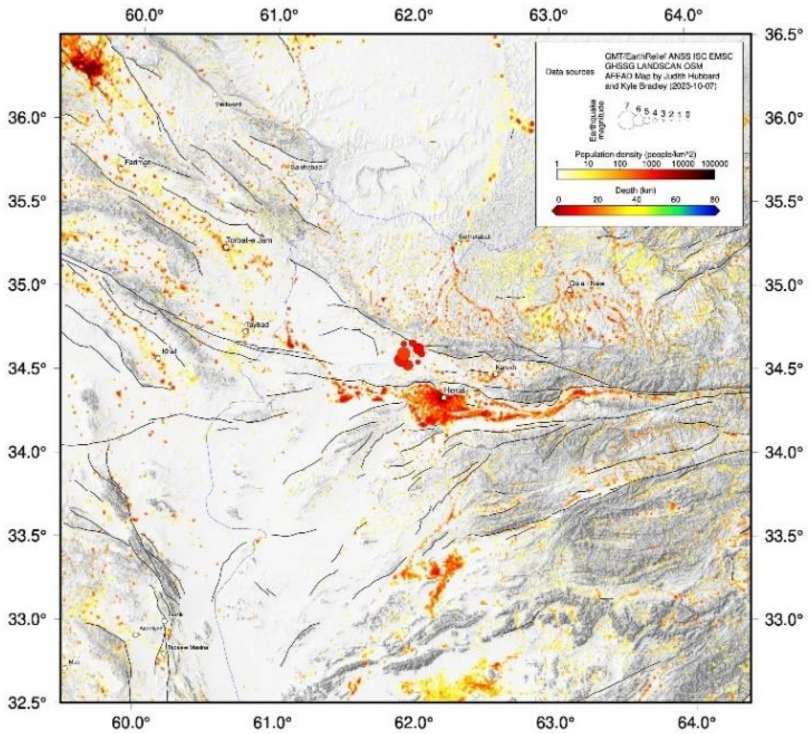
شکل۶- برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای در شبکه‌بندی سلول‌ها برای پهنه گسلی هرات و مناطق اطراف. ابعاد هر سلول ۳۰×۳۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. رنگ‌های گرم‌تر نرخ بالاتر گشتاور لرزه‌ای و رنگ های سردتر نرخ پایین تر را نشان می‌دهند.

Fig.6. Estimation of seismic moment rate in the grid cells for the Herat fault zone and surrounding areas. Each cell is sized 30×30 kilometers. Warmer colors indicate higher seismic moment rates, while cooler colors represent lower rates.

مقدار گشتاور لرزه‌ای برآورد شده برای کل زمین لرزه‌های محدوده مطالعاتی معادل $۲/۲۵\times ۱۰^{۱۹}\ \mathrm{Nm\ yr^{-۱}}$ می‌باشد و مقدار نرخ آن براساس سال‌های موجود در کاتالوگ معادل $۱/۱۸\times ۱۰^{۱۸}\ \mathrm{Nm\ yr^{-۱}}$ که به روش میان‌گیری بر اساس سال‌های موجود در کاتالوگ محاسبه گردیده است. تفاوت در میزان رهایی انرژی در بخش‌های مختلف هرات می‌تواند به دلیل پیچیدگی‌های سنگ‌شناسی، وجود لایه‌های تبخیری، و هندسه گسل‌ها باشد.

تأثیرات اجتماعی- جغرافیایی زمین‌لرزه بر منطقه

نرخ گشتاور لرزه‌ای برآورد شده در کل منطقه مطالعاتی به افزایش تنش در این پهنه لرزه‌خیز اشاره دارد. این نرخ گشتاور قابل توجه نشان‌دهنده پتانسیل لرزه‌خیزی بالای منطقه است که می‌تواند با زمین‌لرزه‌های بزرگ و مخرب همراه باشد. اثرات اجتماعی و جغرافیایی این زمین‌لرزه‌ها در مناطق پرجمعیت و روستایی استان هرات به شکل خسارات گسترده به زیرساخت‌ها و آسیب‌پذیری بالای ساختمان‌های سنتی، خصوصاً در مناطقی مانند انجیل، زنده‌جان و کوشک، نمایان شده است (شکل۷).



شکل۷-نقشه پراکندگی و تراکم جمعیت در اطراف رومرکز زمین لرزه‌های ۲۰۲۳

Fig.7. Map of population distribution and density around the epicenters of the 2023 earthquakes, adapted from (Hubbard & Bradley, 2023).

نتیجه گیری

در مطالعه لرزه‌زمین‌ساخت هرات، پارامترهای لرزه‌ای مانند بعد فرکتالی، مقدار b و نرخ گشتاور لرزه‌ای محاسبه شده‌اند که نشان‌دهنده تغییر شکل‌های فعال ناشی از تنش‌های برخورد صفحات هند و اوراسیا است. این تغییرات به‌صورت دگرشکلی‌های داخلی و زمین‌لرزه‌ها ادامه یافته‌اند. با محاسبه گشتاورهای لرزه‌ای، میزان کل انرژی آزاد شده در منطقه مطالعاتی برابر $۱/۱۸ \times ۱۰^{۱۸}$ Nm $yr^{-۱}$ برآورد شده است. این تحلیل نشان می‌دهد که علاوه بر بخش‌های میانی منطقه، که شامل گسل اصلی هرات و شاخه‌های فرعی آن است، نواحی جنوب شرقی منطقه نیز به عنوان مناطقی با پتانسیل لرزه‌خیزی بالا در آینده شناسایی می‌شوند. این نواحی، جایی که سیستم گسلی هرات فشرده‌تر می‌شود، تحت تنش‌های بیشتری قرار دارند. از مجموع این تحلیل‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که خطر لرزه‌خیزی در مناطقی مانند زنده‌جان، انجیل، غوریان، و کوشان بالا است. همچنین، پهنه‌بندی مرکز سطحی زلزله‌های رخداده در منطقه نشان‌دهنده فعالیت لرزه‌ای بالاتر در بخش‌های شمال غربی است. این یافته‌ها بر ضرورت تدقیق نقشه‌های گسلی و تقویت زیرساخت‌های مقاوم در برابر زلزله به‌ویژه در مناطق پرخطر تأکید می‌کنند.

سپاسگزاری

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از دانشگاه خلیج فارس برای حمایت های ویژه و فراهم آوری فضای مناسب پژوهش و همچنین از جناب دکتر شبیر اشکپور مطلق و جناب دکتر سید رضا منصوری برای ارائه پیشنهادات علمی و بازبینی مقاله اعلام می دارند.

References

Abdullah, S. (1993). Seismic hazard assessment in the Islamic state of Afghanistan. The practice of earthquake hazard assessment, IASPEI/ESC Publication, McGuire RK, ed, 284. https://www.researchgate.net/publication/316643937

Abdullah, S. H., Chmyriov, V. M., & Dronov, V. I. (2008). Geology and mineral resources of Afghanistan. https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/3723

Ambraseys, N. N., Melville, C. (1982). A seismic history of Persian earthquakes. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1002/eqe.4290110412

Bayrak, Y., & Bayrak, E. (2012). Regional variations and correlations of Gutenberg–Richter parameters and fractal dimension for the different seismogenic zones in Western Anatolia. Journal of Asian Earth Sciences, 58, 98-107. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.06.018

Bayrak, Y., & Öztürk, S. (2004). Spatial and temporal variations of the aftershock sequence of the 1999 Izmit and Duzce earthquake. Earth Planets Space, 56, 933-944. https://doi.org/10.1186/BF03351791

Bridges, D. L., & Gao, S. S. (2006). Spatial variation of seismic b-values beneath Makushin Volcano, Unalaska Island, Alaska. Earth and Planetary Science Letters, 245(1-2), 408-415. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.010

Charchi, A., Khatib, M. M., Mozafarkhah, M., & Barjasteh, A. (2011). Fractal analysis for determination of Tectonic activity in the north of Lali, NE Khuzestan. Advanced Applied Geology, 1(1), 37-47. [In Persian] https://aag.scu.ac.ir/article_11542.html?

Cheng, Q., Agterberg, F. P., & Ballantyne, S. B. (1994). The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. Journal of Geochemical exploration, 51(2), 109-130. https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90013-2

Dimiri, V. P. (2000). Application of fractals in the earth sciences. CRC Press, A Balkema Publishers.

Fadami, M., Zarei, S., & Ashkpoor Motlagh, S. (2021). The Seismicity Dissimilarity Investigation of Khuzestan in the Southwest of Zagros using by Fractal Analysis. Bulletin of Earthquake Science and Engineering, 8(3), 1-15. [In Persian] https://doi.org/10.48303/bese.2021.245995

Hubbard, J., & Bradley, K. (2023). Two magnitude 6.3 earthquakes strike northwestern Afghanistan. Earthquake Insights. https://doi.org/10.62481/5776c220

Kanamori, H. (1977). Seismic and aseismic slip along subduction zones and their tectonic implications. Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back-Arc Basins, 1, 163-174. https://doi.org/10.1029/ME001p0163

Nanjo, K., & Nagahama, H. (2004). Fractal properties of spatial distributions of aftershocks and active faults. Chaos, Solitons & Fractals, 19(2), 387-397. https://doi.org/10.1016/S0960-0779(03)00051-1

Öncel, A. O., & Wilson, T. (2004). Correlation of seismotectonic variables and GPS strain measurements in western Turkey. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 109(B11). https://doi.org/10.1029/2004JB003101

Oncel, A. O., & Wilson, T. H. (2002). Space-time correlations of seismotectonic parameters: Examples from Japan and from Turkey preceding the Izmit earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, 92(1), 339-349. https://doi.org/10.1785/0120000844

Pal, P. K. (2008). Geomorphological, Fractal Dimension and b-Value Mapping in Northeast India. The Journal of Indian Geophysical Union, 12, 41-54. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:73582101

Pan, Z., Yun, Z., & Shao, Z. (2020). Contemporary crustal deformation of Northeast Tibet from geodetic investigations and a comparison between the seismic and geodetic moment release rates. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 304, 106489. https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106489

Rashidi, A., Khatib, M. M., Mosavi, S. M., & Jamor, Y. (2017). Estimation of the active faults, based on Seismic, geologic and geodetic moment rates in the South and West of Lut block. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 26(104), 211-222. [In Persian] https://doi.org/10.22071/gsj.2017.50265

Roumina, A., Zarei, S., Mansouri, S. R., & Azadijou, O. (2023). Seismic distribution in the south of Zagros using the statistical correlation between b-Value and fractal dimension. Iranian Journal of Geophysics, 17(1), 89-107. [In Persian] https://doi.org/10.30499/ijg.2022.335123.1413

Scholz, C. H. (1968). The frequency-magnitude relation of micro fracturing in rock and its relation to earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 58(1), 399-415. https://doi.org/10.1785/BSSA0580010399

Shnizai, Z. (2020). Mapping of active and presumed active faults in Afghanistan by interpretation of 1-arcsecond SRTM anaglyph images. Journal of Seismology, 24(6), 1131-1157. https://doi.org/10.1007/s10950-020-09933-4

Siehl, A. (2017). Structural setting and evolution of the Afghan orogenic segment–a review. Geological Society, London, Special Publications, 427(1), 57-88. https://doi.org/10.1144/SP427.8

Singh, A. P., Mishra, O. P., Kumar, D., Kumar, S., & Yadav, R. B. S. (2012). Spatial variation of the aftershock activity across the Kachchh Rift Basin and its seismotectonic implications. Journal of Earth System Science, 121, 439-451. https://doi.org/10.1007/s12040-012-0175-9

Tavakoli Zadeh, N., Rahimi, B., Ghaemi, F. (2016). The study of seismotectonics and asperities in Zagros through the b-value parameter. 34th National and the 2nd International Geosciences Congress.[In Persian]

Tosi, P., De Rubeis, V., Loreto, V., & Pietronero, L. (2008). Space–time correlation of earthquakes. Geophysical Journal International, 173(3), 932-941. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03770.x

Treloar, P. J., & Izatt, C. N. (1993). Tectonics of the Himalayan collision between the Indian plate and the Afghan block: A synthesis. Geological Society, London, Special Publications, 74(1), 69-87. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1993.074.01.06

Turcotte, D. L. (1997). Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. New York: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139174695

Wyss, M. (1973). Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. Geophysical Journal International, 31(4), 341-359. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1973.tb06506.x

Yadav, R. B. S., Gahalaut, V. K., Chopra, S., & Shan, B. (2012). Tectonic implications and seismicity triggering during the 2008 Baluchistan, Pakistan earthquake sequence. Journal of Asian Earth Sciences, 45, 167-178. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.10.003

Zarei, S., Khatib, M. M., Zare, M., & Moussavi, S. M. (2020). Estimation of the Seismicity Potential, Based on Geodetic, Seismic, and Geological Moment Rate in the Lut Block. Bulletin of Earthquake Science and Engineering, 7(1), 15-36. [In Persian] https://www.bese.ir/article_240420.html